

# 一种改善逆波束形成显示效果的方法\*

郑恩明<sup>1,2†</sup> 陈新华<sup>1</sup> 孙长瑜<sup>1</sup> 余华兵<sup>1</sup>

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)  
(2 中国科学院大学 北京 100190)

**摘要** 在低信噪比条件下,由于协方差矩阵中主对角元素相比其他元素所含噪声能量大,致使逆波束形成(IBF)所得空间谱中目标方位处能量与其他方位处能量差别小、显示效果不好。对此,本文采用对协方差矩阵主对角元素进行修正法来降低噪声对IBF的影响,扩大目标方位与其他方位处能量差别,改善空间谱显示效果。Matlab数值仿真和湖试数据处理结果均表明:在低信噪比条件下,本方法可改善IBF所得空间谱的显示效果。本方法简单有效,可满足实际工程应用,为改善方位历程显示效果提供一个参考。

**关键词** 信息处理技术,逆波束形成,主对角元素修正,显示效果

**中图分类号:** TB565

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-310X(2013)05-0388-07

## An improved method to enhance the display effect of inverse beam-forming

ZHENG Enming<sup>1,2</sup> CHEN Xinhua<sup>1</sup> SUN Changyu<sup>1</sup> YU Huabing<sup>1</sup>

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)  
(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract** In the condition of lower signal-to-noise ratio (SNR), because the main diagonal elements contains more noise than other elements in covariance matrix, the energy difference between the target area and others area is small in spatial spectrum of inverse beam-forming (IBF), and the display effect of spatial spectrum is not desirable. In this paper, we corrected the main diagonal elements of covariance matrix to reduce the noise impact on IBF, enlarge the energy difference between the target area and others area, and improve display effect of space spectrum. Matlab numerical simulation and processed results of lake data show that this method can improve display effect of space spectrum for IBF in lower SNR. The method is simple and effective, and suitable for the practical application, and provides an alternative method for improving time/bearing display effect.

**Key words** Information processing technology, Inverse beam-forming, Main diagonal element correction, Display effect

2012-08-14 收稿; 2012-12-04 定稿

\*国家海洋公益性行业科研专项经费项目(201005001)资助课题

作者简介: 郑恩明 (1985-), 男, 河南周口人, 博士研究生, 研究方向: 水声信号与信息处理、水下声学定位系统研究。

陈新华 (1978-), 男, 博士, 副研究员。 孙长瑜 (1954-), 男, 研究员, 博士生导师。 余华兵 (1975-), 男, 副研究员, 硕士生导师。

†通讯作者: 郑恩明, E-mail: zhengenming09@mails.ucas.ac.cn

### 1 引言

随着信噪比的不断降低，对线列阵检测目标的要求也在不断增加。低信噪比下，由波束形成所得空间谱中目标方位处能量是由信号和噪声累加所得，而其他方位处能量是由背景噪声所得，致使低信噪比下，所得空间谱中目标方位处能量与其他方位处能量差别小，显示效果不好。对此，文献[1-3]中提到对波束形成所得空间谱进行背景均衡等后置处理技术来改善其显示效果，以便工作人员从图像中能直观的得到目标方位。由于在逆波束形成 (Inverse beam forming, IBF) 算法中需要用到阵元间协方差矩阵<sup>[4-6]</sup>。理论分析发现：背景噪声为高斯白噪声的条件下，不同阵元间背景噪声相关性小，目标信号相关性大使协方差矩阵中主对角线上的元素相比其他位置处元素所含噪声能量大、信号能量基本一样。低信噪比下，怎样修正协方差矩阵来降低主对角元素所含噪声对逆波束形成的影响是本文的思想来源。对此，本文提出进行逆波束形成前先对阵元间协方差矩阵  $\mathbf{R}$  主对角元素进行修正，以减弱主对角元素所含噪声对逆波束形成的影响。数值仿真和处理湖试数据表明：修正主对角元素后的逆波束形成 (Diagonal IBF, DL\_IBF) 所得空间谱中目标方位处与其他方位处能量差别比 IBF 未经任何处理所得空间谱中目标方位处与其他方位处能量差别大，方位历程图显示效果好。

### 2 逆波束形成

IBF 的原理是声场平面波密度可用各阵元接收信号互谱密度 (即协方差矩阵) 中的方位信息来估计<sup>[4-6]</sup>。对图 1 所示阵元数为  $N$  的等间距水平线阵，目标从  $\theta$  方向辐射频率为  $f$  的窄带信号，经水声信道传播后到达各阵元，则各阵元接收信号可表示为

$$x_i(t) = P_i \cdot s(t) \cdot e^{j(i-1)dk \cos \theta} + n_i(t), \quad (1)$$

其中：  $s(t) = e^{j2\pi ft}$  为目标在  $t$  时刻辐射信号，  $P_i$  为第  $i$  阵元接收信号幅度，  $i$  为阵元号，  $d$  为阵间距，  $k = 2\pi f / c$  为波数，  $c$  为有效声速，  $n_i(t)$  为第  $i$  个阵元在  $t$  时刻接收的背景噪声。

阵元间协方差矩阵  $\mathbf{R}$  为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} x_1(t)x_1^*(t) & x_1(t)x_2^*(t) & \cdots & x_1(t)x_N^*(t) \\ x_2(t)x_1^*(t) & x_2(t)x_2^*(t) & \cdots & x_2(t)x_N^*(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_N(t)x_1^*(t) & x_N(t)x_2^*(t) & \cdots & x_N(t)x_N^*(t) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据式(2)所示内容，容易证明  $\mathbf{R}$  满足  $\mathbf{R}^H = \mathbf{R}$ ，属于 Hermitian 矩阵。所以对  $\mathbf{R}$  做 Toeplitz 平均，将其转化为具有空间分布的一维分布数据：

$$D(n) = \frac{1}{N - |n|} \sum_{p=0}^{N-1-|n|} \mathbf{R}(p, p+n), \quad (3)$$

其中：  $|n| \leq N - 1$ ，  $0 \leq p \leq N - 1 - |n|$ ，  $N$  为有效阵元数。

对式(3)中  $D(n)$  做积分，可得到 IBF 算法在  $\theta'$  方向的 IBF\_FIM( $f, \theta'$ ) 为

$$\text{IBF\_FIM}(f, \theta') = \sum_{n=1-N}^{N-1} D(n) e^{-jndk \cos \theta'}. \quad (4)$$

对式(4)中  $\theta'$  做  $0 \sim 179^\circ$  空间扫描即可完成 IBF，得到频率  $f$  处的空间谱 IBF\_FIM( $f$ )。

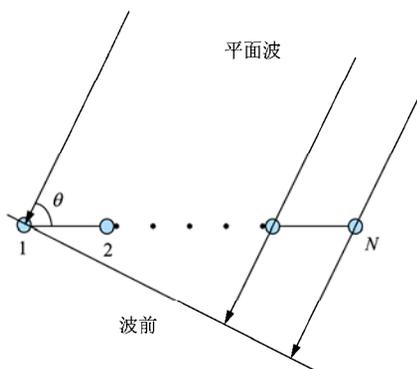


图 1 水平线阵接收信号示意图

### 3 主对角元素修正原理

根据图 1 所示的水平线阵，假设各阵元接收的信号为平稳窄带信号  $s_i(t)$ ，背景噪声为各向同性的宽带高斯白噪声  $n_i(t)$ ，其中  $i$  为阵元号，  $t$  为采样时刻，则阵元  $i$  在  $t$  时刻接收的数据为  $x_i(t) = s_i(t) + n_i(t)$ 。

现讨论背景噪声为高斯白噪声条件下，协方差矩阵  $\mathbf{R}$  中主对角元素所含信号能量、噪声能量分别与总能量的比值，以及怎样修正  $\mathbf{R}$  来降低主对角元素所含噪声对逆波束形成的影响。

将各阵元接收数据按矩阵形式可表示为

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(t) + n_1(t) \\ s_2(t) + n_2(t) \\ \vdots \\ s_N(t) + n_N(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中： $N$  为有效阵元数。

则协方差矩阵  $\mathbf{R}$  的详细推导公式如下<sup>[7]</sup>：

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = \mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t) &= \begin{bmatrix} s_1(t) + n_1(t) \\ s_2(t) + n_2(t) \\ \vdots \\ s_N(t) + n_N(t) \end{bmatrix} \cdot [s_1(t) + n_1(t), s_2(t) + n_2(t), \dots, s_N(t) + n_N(t)] \\ &= \begin{bmatrix} (s_1(t) + n_1(t))(s_1(t) + n_1(t))^* & (s_1(t) + n_1(t))(s_2(t) + n_2(t))^* & \cdots & (s_1(t) + n_1(t))(s_N(t) + n_N(t))^* \\ (s_2(t) + n_2(t))(s_1(t) + n_1(t))^* & (s_2(t) + n_2(t))(s_2(t) + n_2(t))^* & \cdots & (s_2(t) + n_2(t))(s_N(t) + n_N(t))^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (s_N(t) + n_N(t))(s_N(t) + n_N(t))^* & (s_1(t) + n_1(t))(s_2(t) + n_2(t))^* & \cdots & (s_N(t) + n_N(t))(s_N(t) + n_N(t))^* \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(6)所示, 令协方差矩阵  $\mathbf{R}$  中所有信号总能量为  $P_s$ 、所有噪声总能量为  $P_n$ 、信号与噪声相关所得能量为  $P_{sn}$ 、总能量为  $P_{ow}$ 、主对角线所有元素所含信号能量为  $DL\_P_s$  以及主对角线所有元素所含背景噪声能量为  $DL\_P_n$ , 可表示为

$$\begin{cases} P_s = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N s_j(t)s_i^*(t), \\ P_n = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N n_j(t)n_i^*(t), \\ P_{sn} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N s_j(t)n_i^*(t), \\ P_{ow} = P_s + P_n + P_{sn}, \\ DL\_P_s = \sum_{i=1}^N s_i(t)s_i^*(t), \\ DL\_P_n = \sum_{i=1}^N n_i(t)n_i^*(t). \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)可知, 在背景噪声为高斯白噪声条件下, 不同阵元间的背景噪声信号相关性小, 不同阵元间的信号相关性大, 即为协方差矩阵  $\mathbf{R}$  主对角线上每个元素所含背景噪声能量远大于其他元素所含背景噪声能量, 主对角线上每个元素所含信号能量与其他元素所含能量相差不多, 可表示为

$$\begin{cases} n_j(t)n_i^*(t) \ll n_i(t)n_i^*(t) \\ s_j(t)s_i^*(t) \approx s_i(t)s_i^*(t) \end{cases}, (j \neq i, 1 \leq i, j \leq N). \quad (8)$$

在低信噪比下, 可进一步得知

$$s_i(t)s_i^*(t) \ll n_i(t)n_i^*(t), (1 \leq i \leq N). \quad (9)$$

在低信噪比下, 根据式(7)-(9)可得

$$\begin{cases} DL\_P_s \approx \frac{P_s}{N} \ll P_s, \\ DL\_P_s \ll DL\_P_n, \\ DL\_P_n \approx P_n. \end{cases} \quad (10)$$

所以, 在低信噪比下, 协方差矩阵  $\mathbf{R}$  中主对角线上所有元素所含噪声能量比较大, 且远超过信号能量, 对此进行修正可进一步降低主对角线上元素所含噪声对逆波束形成的影响。在不同阵元数  $N$  和不同信噪比  $SNR$  下, 可用 Matlab 进行数值仿真来求取  $\mathbf{R}$  中主对角线所有元素所含信号能量、噪声能量分别与总能量的比值, 以便找到修正协方差矩阵的方法来降低主对角线元素所含噪声对逆波束形成的影响。

Matlab 数值仿真中采用频率为  $f_1 = 500$  Hz 的正弦信号作为目标辐射信号，目标辐射信号相对水平线阵方位角为  $\theta_1 = 60^\circ$ ；另外，假设背景噪声为各向同性的高斯白噪声，频带为  $f = 100 \sim 800$  Hz。水平

线阵阵元数  $N = 16, 32, 64$ ，阵间距为  $d = c/3f_1$ ，其中  $c = 1500$  m/s 为有效声速，采样率为  $f_s = 5$  kHz，快拍数为  $M = 2000$ 。表 1 数据为根据式(7)由 200 次独立统计所得。

表 1 DL\_Ps、DL\_Pn 与总能量的比值

SNR(dB)	N = 16		N = 32		N = 64	
	$\frac{DL\_Ps}{Pow}$	$\frac{DL\_Pn}{Pow}$	$\frac{DL\_Ps}{Pow}$	$\frac{DL\_Pn}{Pow}$	$\frac{DL\_Ps}{Pow}$	$\frac{DL\_Pn}{Pow}$
无噪声	0.0625	0.0000	0.0313	0.0000	0.0156	0.0000
0	0.0554	0.0553	0.0284	0.0286	0.0144	0.0145
-5	0.0460	0.1450	0.0247	0.0783	0.0128	0.0409
-10	0.0305	0.3048	0.0179	0.1788	0.0098	0.0980
-16	0.0126	0.5010	0.0083	0.3313	0.0050	0.2011
-20	0.0058	0.5808	0.0040	0.4034	0.0025	0.2504
-25	0.0020	0.6293	0.0014	0.4521	0.0009	0.2893
无信号	0.0000	0.6633	0.0000	0.4878	0.0000	0.3191

根据表 1 中数据可知：在  $N = 16$ 、 $SNR < -16$  dB 时， $\frac{DL\_Pn}{Pow} > 50\%$ 、 $\frac{DL\_Ps}{Pow} < 1.26\%$ ；在  $N = 32$ 、 $SNR < -16$  dB 时， $\frac{DL\_Pn}{Pow} > 33\%$ 、 $\frac{DL\_Ps}{Pow} < 0.83\%$ ；在  $N = 64$ 、 $SNR < -16$  dB 时， $\frac{DL\_Pn}{Pow} > 20\%$ 、 $\frac{DL\_Ps}{Pow} < 0.50\%$ ； $SNR < -16$  dB 时，不论  $N$  为多少，可知  $\frac{DL\_Pn}{DL\_Ps} \geq 40$ 。

所以在阵元数不大、背景噪声为白噪声、以及信噪比较低时，协方差矩阵主对角线上所有元素所含噪声能量占总能量的 50% 左右，而信号能量占总能量的 1.5% 不到，噪声能量与信号能量的比为  $\frac{DL\_Pn}{DL\_Ps} \geq 40$ 。所以，对协方差矩阵主对角元素进

行修正可降低背景噪声对逆波束形成的影响，进而扩大波束形成所得空间谱中目标方位处能量与其他方位处能量的差别，改善方位历程图显示效果。

可按式(11)对  $R$  主对角元素进行修正。

$$R(i, i) = 0, \tag{11}$$

其中  $i \leq N$ ， $N$  为阵元数。

## 4 实验结果

### 4.1 数值仿真分析

在低信噪比下，为了验证修正主对角元素后的

逆波束形成 (DL\_IBF) 所得空间谱具有较好的显示效果。分别对单目标和多目标辐射信号的情况下，采用 Matlab 进行数值仿真，仿真模型是在远场平面波，背景噪声为高斯白噪声条件下形成的，其包含信号产生、信号处理和目标方位解算三部分，如图 2 所示。

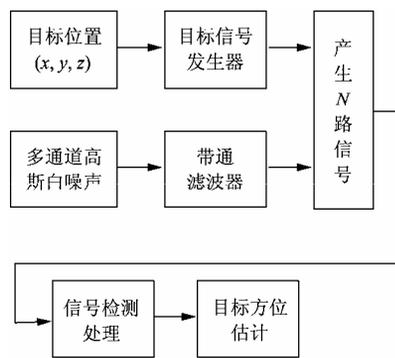
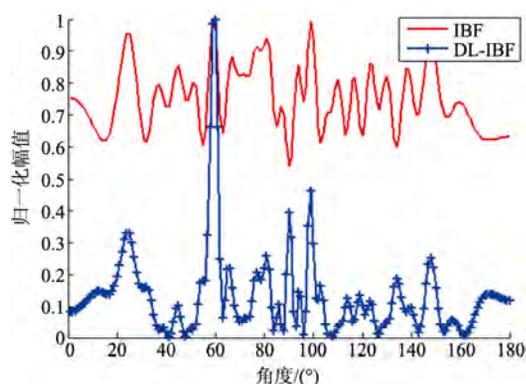


图 2 Matlab 仿真模型框图

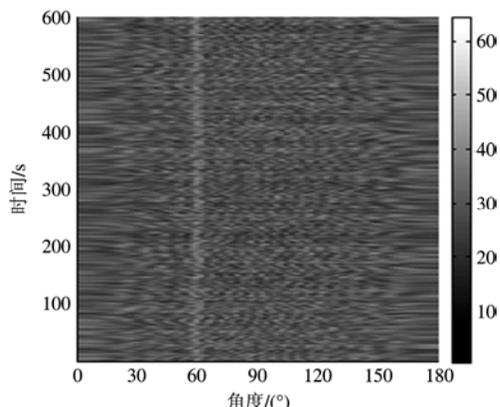
#### (1) 单目标情况

仿真中采用频率为  $f = 500$  Hz、幅度为  $A = 1$  v 的正弦信号作为目标辐射信号，目标辐射信号相对水平线阵方位角为辐射角  $\theta = 60^\circ$ ；另外，假设背景噪声为各向同性的高斯白噪声，频带为  $f = 100 \sim 800$  Hz。水平线阵阵元数  $N = 32$ ，阵间距为  $d = c/3f$ ，其中  $c = 1500$  m/s 为有效声速，采样率为  $f_s = 5$  kHz，快拍数为  $M = 2000$ 。

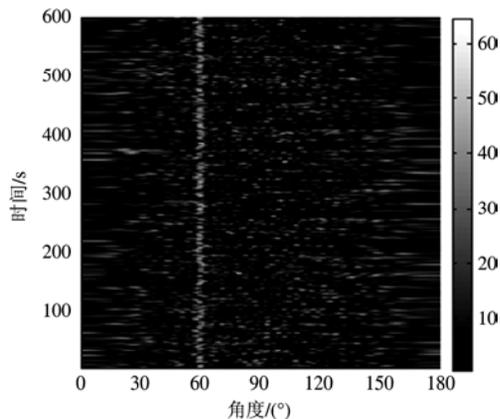
图 3(a)~3(c)为在  $SNR = -25$  dB 条件下，两种方法所得空间谱图和方位历程图。



(a) 两种方法所得空间谱瞬时图



(b) IBF 空间谱方位历程图



(c) DL-IBF 空间谱方位历程图

图3 单目标下 IBF 与 DL-IBF 空间谱图

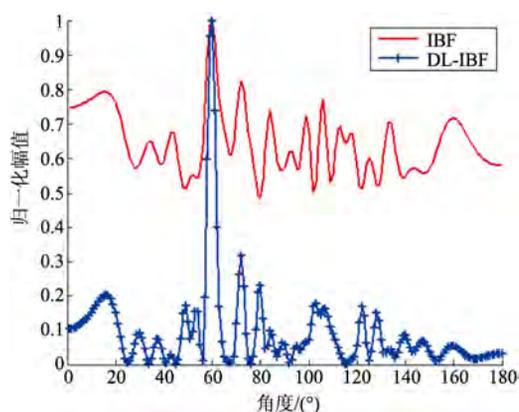
从图 3(a)中可得: 单目标情况下, 经主对角元素修正过的逆波束形成算法所得空间谱中目标方位与其他方位处能量差别比未经任何处理所得空间谱中目标方位与其他方位处能量差别大; 同时对比图 3(b)与图 3(c)得到: 图 3(c)所示的方位历程图中目标方位显示效果好于图 3(b) 所示的方位历程图中目标方位显示效果。

## (2) 不等强度多目标情况

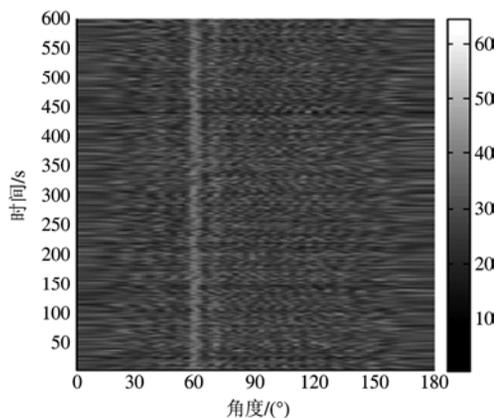
仿真中采用频率为  $f_1 = 500$  Hz、幅度为  $A_1 = 1$  v 的正弦信号作为目标辐射信号, 目标 1 辐射信号相对

水平线阵方位角为辐射角  $\theta_1 = 60^\circ$ ; 频率为  $f_2 = 300$  Hz、幅度为  $A_2 = 0.5$  v 的正弦信号作为目标 2 辐射信号, 目标 2 辐射信号相对水平线阵方位角为辐射角  $\theta_2 = 70^\circ$ ; 另外, 假设背景噪声为各向同性的高斯白噪声, 频带为  $f = 100 \sim 800$  Hz。水平线阵阵元数  $N = 32$ , 阵间距为  $d = c/3f_1$ , 其中  $c = 1500$  m/s 为有效声速, 采样率为  $f_s = 5$  kHz, 快拍数为  $M = 2000$ 。

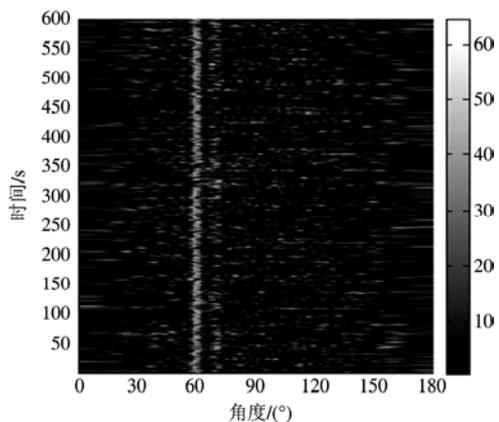
图 4(a)~4(c)为在 SNR = -23 dB 条件下, 两种方法所得空间谱图和方位历程图。



(a) 两种方法所得空间谱瞬时图



(b) IBF 空间谱方位历程图



(c) DL-IBF 空间谱方位历程图

图4 不等强度多目标下 IBF 与 DL-IBF 空间谱图

同样从图 4(a)中可得：多目标情况下，经主对角元素修正过的逆波束形成算法所得空间谱中强目标方位与其他方位处能量差别比未经任何处理所得空间谱的强目标方位与其他方位处能量差别大许多；但由于弱目标能量比较小，所以从图 4(a)两种方法都不能很好的实现对弱目标的检测，这也是接下来需要进一步探讨的问题。对比图 4(b)与图 4(c)可得：图 4(c)所示的方位历程图中目标方位显示效果好于图 4(b)所示的方位历程图中目标方位显示效果，且图 4(c)相比图 4(b)也能够很好的显示出弱目标的方位。

### (3) 等强度多目标情况

仿真中采用频率为  $f_1 = 500 \text{ Hz}$ 、幅度为  $A_1 = 1 \text{ v}$  的正弦信号作为目标辐射信号，目标 1 辐射信号相对水平线阵方位角为辐射角  $\theta_1 = 60^\circ$ ；频率为  $f_2 = 300 \text{ Hz}$ 、幅度为  $A_2 = 1 \text{ v}$  的正弦信号作为目标 2 辐射信号，目标 2 辐射信号相对水平线阵方位角为辐射角  $\theta_2 = 70^\circ$ ；另外，假设背景噪声为各向同性的高斯白噪声，频带为  $f = 100 \sim 800 \text{ Hz}$ 。水平线阵阵元数  $N = 32$ ，阵间距为  $d = c/3f_1$ ，其中  $c = 1500 \text{ m/s}$  为有效声速，采样率为  $f_s = 5 \text{ kHz}$ ，快拍数为  $M = 2000$ 。

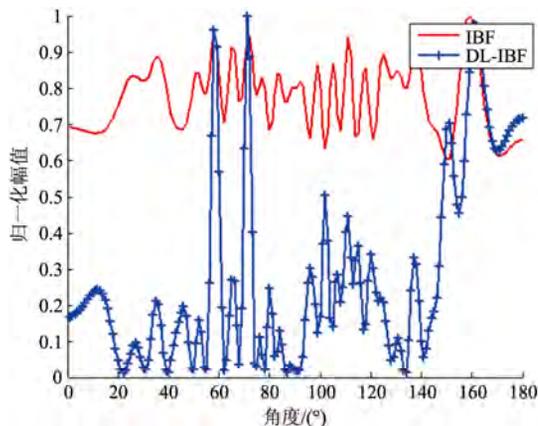
图 5(a)~5(c)为在  $\text{SNR} = -23 \text{ dB}$  条件下，两种方法所得空间谱图和方位历程图。

同样从图 5(a)中可得：经主对角元素修正的逆波束形成算法所得空间谱中目标方位与其他方位处能量差别比未经任何处理所得空间谱中目标方位与其他方位处能量差别大许多。对比图 5(b)与图 5(c)可得：图 5(c)所示的方位历程图中目标方位显示效果好于图 5(b)所示的方位历程图中目标方位显示效果。

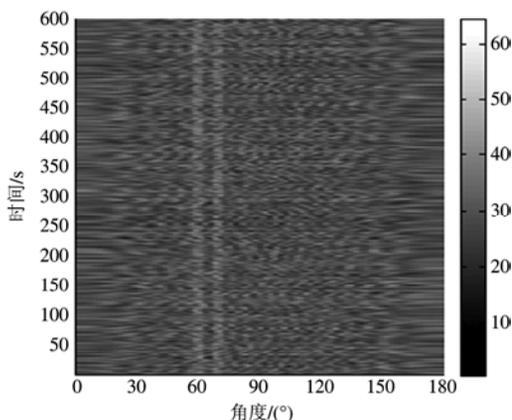
所以，根据图 3 至图 5 的仿真结果可得：在低信噪比下，经主对角元素修正过的逆波束形成算法所得空间谱中目标方位与其他方位处能量差别比未经任何处理所得空间谱中目标方位与其他方位处能量差别得到了有效地扩大。经主对角元素修正过的逆波束形成算法所得空间谱中目标方位显示效果好于未经任何处理所得空间谱中目标方位显示效果，与理论分析相符合。

## 4.2 湖试数据分析

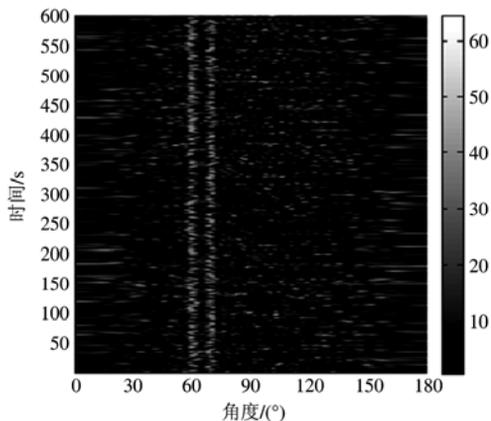
湖试数据为 2012 年春在某湖进行相关项目湖试采集存储所得。试验所用发射和接收船设备如图 6



(a) 两种方法所得空间谱瞬时图



(b) IBF 空间谱方位历程图



(c) DL\_IBF 空间谱方位历程图

图 5 等强度多目标下 IBF 与 DL\_IBF 空间谱图

所示，发射船所用声源为 UW350 (80 ~ 1000 Hz) 布放于 20 m 深度，发射频率为  $f = 500 \text{ Hz}$ ，脉冲长度为  $T_w = 0.5 \text{ s}$ ，发射船为试验站的快艇驶出后静止；接收系统为 32 元等间距线阵，阵元间距为 1 m，线阵布放于水下 10 m，接收船驶到一定位置后停止。

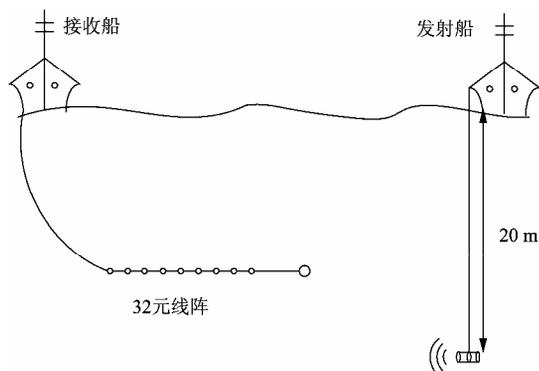
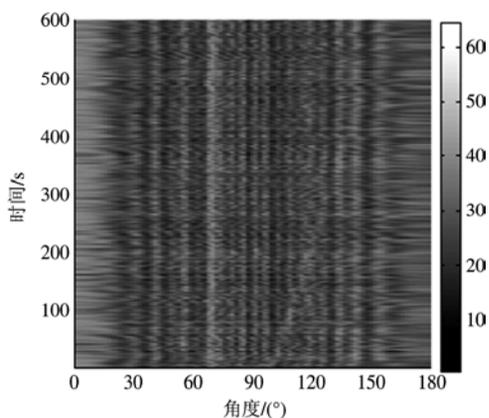


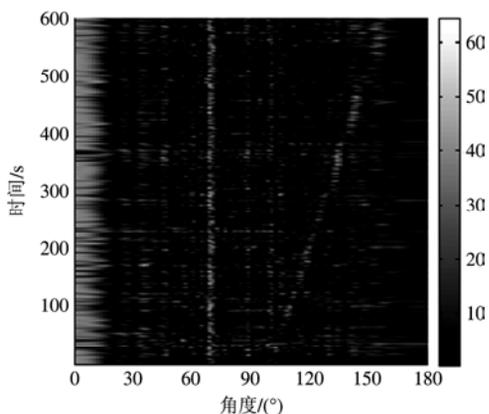
图6 湖试实验系统图

接收系统按采样率  $f_s = 5 \text{ kHz}$  进行采样和存储，图7为部分存储数据的Matlab处理分析。

由DL\_IBF和IBF处理湖试数据所得方位历程图7(a)和图7(b)可知：在 $0^\circ$ 附近存在干扰的情况下，



(a) IBF方法处理试验数据所得方位历程图



(b) DL\_IBF方法处理试验数据所得方位历程图

图7 两种方法处理试验数据所得方位历程图

DL\_IBF能够清晰地显示出 $70^\circ$ 附近存在目标(实验所用接收船)，也能显示出 $0\sim 600 \text{ s}$ 时间段内有快艇相对线阵从 $100^\circ$ 左右至 $150^\circ$ 左右通过；而IBF不能够清晰地显示出 $70^\circ$ 附近存在目标，也不能够有效显示出有快艇相对线阵从 $100^\circ$ 左右至 $150^\circ$ 左右通过。实验数据处理同样验证了DL\_IBF相比IBF可以改善方位历程图的显示效果。

## 5 结论

仿真分析和湖试数据均表明：在低信噪比和目标辐射信号为窄带信号的条件条件下，应用本文所提出的修正协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 主对角元素法的DL\_IBF可以扩大IBF所得空间谱中目标方位处能量与其他方位处能量的差别，改善方位历程图显示效果。方法简单有效，可满足实际应用。由式(11)可知主对角元素所含信号能量相比所有能量较小，在高信噪比下，Matlab仿真也验证了本方法对逆波束形成影响较小（由于篇幅限制，文中未出示仿真结果）。本方法对于宽带目标信号下同样适用。同时，在本方法基础上还可进行其他技术手段的后置处理；所以本方法很适合于阵元数不大、在低信噪比、以及背景噪声相关小情况下的逆波束形成。但对于本方法能否进一步提高对目标的检测性能还有待进一步探讨。

## 参考文献

- [1] EWEDA E. Global Stabilization of the Least Mean Fourth Algorithm[J]. IEEE Trans. Signal. Process., 2012, 60(3): 1473-1477.
- [2] 李启虎, 潘学宝, 尹力. 数字式声呐中一种新的背景均衡算法[J]. 声学学报, 2000, 25(1): 5-9.
- [3] 李启虎. 数字式声呐设计原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2003.
- [4] WILSON J H. Applications of inverse beam-forming theory[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 98: 3250-3261.
- [5] 万谨, 宋志杰. 基于滑动平均的等间隔线阵逆波束形成[J]. 声学技术, 2007, 26(3): 483-487.
- [6] 陈立纲, 苑秉成, 刘建国. 改进的逆波束形成高分辨方位估计方法[J]. 兵工学报, 2011, 32(3): 309-304.
- [7] 丁玉美, 阔永红, 高新波. 数字信号处理—时域离散随机信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006:149-160.